

This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

**As rescanning documents *will not* correct images,
please do not report the images to the
Image Problem Mailbox.**

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 07-181087

(43)Date of publication of application : 18.07.1995

(51)Int.Cl.

G01K 11/12

G02B 6/00

G02B 6/12

G06F 7/60

(21)Application number : 02-411026

(71)Applicant : NIPPON TELEGR & TELEPH
CORP <NTT>

(22)Date of filing : 17.12.1990

(72)Inventor : AIZAWA SHIGEKI
NOGUCHI KAZUHIRO
MATSUMOTO TAKAO

(54) OPTICAL WAVEGUIDE TEMPERATURE SENSOR

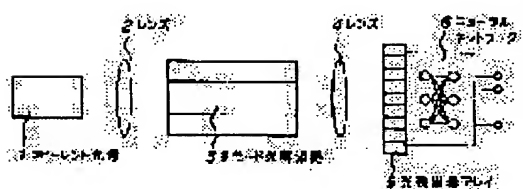
(57)Abstract:

PURPOSE: To obtain a sensor having simple structure by employing an optical waveguide for sensing which can propagate a plurality of modes and providing a coherent light source for exciting a plurality of modes, first and second optical coupling means, etc.

CONSTITUTION: Light emitted from a coherent light source 1 passes through a lens 2 and enters into an optical waveguide 3 for sensing. A plurality of modes are excited in the waveguide 3 and propagated through the waveguide. When the temperature of the waveguide 3 varies, the refractive index or the length thereof is varied to cause variation in the near field pattern of light leaving the waveguide 3. The output light from the waveguide 3 is coupled with an optical detector array 5 through a lens 4 and converted into an electric signal which is fed to a neural network.

A work 6 determines the temperature from the

output intensity distribution of the optical waveguide according to internal parameters preset by learning.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

CLAIMS

[Claim(s)]

[Claim 1] An optical waveguide temperature sensor characterized by providing the following. Optical waveguide for sensing from which mode distribution of light which guides waves according to temperature changes A source of coherent light which can excite two or more modes in said optical waveguide for sensing The first optical coupling means which combines output light from said source of coherent light with said optical waveguide for sensing A temperature conversion means to change into a temperature change mode distribution of light outputted from said optical waveguide for sensing based on relation of mode distribution of light and temperature which change with temperature of said optical waveguide for sensing learned beforehand, and the second optical coupling means which combines output light from said optical waveguide for sensing with said temperature conversion means

[Claim 2] An optical waveguide temperature sensor according to claim 1 characterized by using an optical fiber as said first optical coupling means.

[Claim 3] As said first and second optical coupling means, output light from said source of coherent light is combinable with said optical waveguide for sensing. And an optical directional coupler which separates output light from said optical waveguide for

sensing with output light from said source of coherent light, and can be combined with said temperature conversion means is used. An optical waveguide temperature sensor according to claim 1 characterized by forming a reflective film in one end face of said optical waveguide for sensing for guided wave light.

[Claim 4] An optical waveguide temperature sensor according to claim 1 characterized by establishing a reflective means to use an optical circulator which can combine output light from said source of coherent light with said optical waveguide for sensing, and can combine output light from said optical waveguide for sensing with said temperature conversion means as said first and second optical coupling means, and to reflect guided wave light by one end face of said optical waveguide for sensing.

[Claim 5] An optical waveguide temperature sensor according to claim 1 characterized by using a bundle fiber which can spread optical reinforcement in each location of said optical waveguide for sensing for said temperature conversion means corresponding to this as said second optical coupling means.

[Claim 6] Said temperature conversion means is an optical waveguide temperature sensor according to claim 1 characterized by consisting of neural networks who process with an electrical signal by making into the input section a photodetection array which changes a lightwave signal into an electrical signal, and said detection array.

[Detailed Description of the Invention]

[0001]

[Industrial Application] This invention relates to the temperature sensor using optical waveguide.

[0002]

[Description of the Prior Art] As this conventional kind of technology, the waveguide form temperature sensor shown in drawing 9 is known ("Integrated optical temperature sensor", Appl.Phys.Lett., 41 and 15, pp 134-136 (1982)). The coherent input light 101 inputted into optical waveguide 102 as shown in this drawing branches in optical waveguide 102 four, and advances the Mach TSUENDA form waveguides A, B, and C and the waveguide REF for monitors respectively. Here, it sets to waveguide 102 and is ΔL_A about the optical-path-length difference of the Mach TSUENDA form waveguide A. When it carries out, the optical-path-length difference of the Mach TSUENDA form waveguide B is $\Delta L_A + \lambda / 4n_{eff}$, It is designed so that the optical-path-length difference of the Mach TSUENDA form waveguide C may be set to $\Delta L_A / 5$.

[0003] At this time, the output light reinforcement and the proportionality constant b of

the Mach TSUENDA form waveguides A, B, and C are expressed with a degree type.
[Equation 1]

Here, λ is wavelength and T is temperature and N_{eff} . The effective refractive index of the core of waveguide, P_{in1} , P_{in2} , and P_{in3} It is the input light reinforcement of the Mach TSUENDA form waveguides A, B, and C, $\Delta\phi_0$, and $\Delta\phi_1$, respectively. It is a constant. The temperature dependence of the output reinforcement of the Mach TSUENDA form waveguides A, B, and C is shown in drawing 10 . Here, change of the optical reinforcement to a temperature change, i.e., the inclination of a graph, expresses the sensitivity of a sensor. Moreover, in one period, although the output light reinforcement of optical waveguide changes periodically to temperature, since temperature and optical reinforcement support 1 to 1, they can search for temperature immediately from optical reinforcement. This is called dynamic range of a sensor. Since the output of the Mach TSUENDA form waveguides A and B has the phase contrast of 90 degrees mutually, the sensitivity of the Mach TSUENDA form waveguide B is the highest in the place where the sensitivity of the Mach TSUENDA form waveguide A becomes the minimum. Thus, by using two Mach-Zehnder interferometers, the portion of each other to which sensitivity falls is compensated. On the other hand, since the period of change of optical reinforcement [as opposed to temperature compared with the Mach TSUENDA form waveguide A] is 5 times later [the Mach TSUENDA form waveguide C], compared with the case where the optical output of the Mach TSUENDA form waveguide A is used, the dynamic range has also increased 5 times by using the optical output of the Mach TSUENDA form waveguide C. Furthermore, the monitor of the optical reinforcement of the waveguide REF for monitors was carried out, change of input light reinforcement was supervised, and a change on the strength is amended.

[0004]

[Problem(s) to be Solved by the Invention] In the conventional optical waveguide temperature sensor, a dynamic range is expandable, maintaining high sensitivity by using three Mach TSUENDA form waveguides A, B, and C, as mentioned above.

[0005] However, in the former, since the large thing of a dynamic range was moreover constituted from high sensitivity, there was a trouble that structure was complicated and creation needed to use difficult sensing optical waveguide.

[0006] This invention is made in view of the above-mentioned conventional technology, and creation is easy and it aims at offering an optical waveguide temperature sensor using the easy optical waveguide of structure.

[0007]

[Means for Solving the Problem] Optical waveguide for sensing from which mode distribution of light which a configuration of this invention which attains this purpose guides according to temperature changes, A source of coherent light which can excite two or more modes in optical waveguide for sensing, The first optical coupling means which combines output light from a source of coherent light with optical waveguide for sensing, A temperature conversion means to change into a temperature change mode distribution of light outputted from optical waveguide for sensing based on relation of mode distribution of light and temperature which change with temperature of optical waveguide for sensing learned beforehand, It is characterized by having the second optical coupling means which combines output light from optical waveguide for sensing with a temperature conversion means.

[0008] Here, a bundle fiber can be used as an optical fiber and second optical coupling means as first optical coupling means, respectively.

[0009] Moreover, output light from a source of coherent light is combinable with optical waveguide for sensing as first and second optical coupling means. And output light from an optical directional coupler which separates output light from optical waveguide for sensing with output light from a source of coherent light, and can be combined with a temperature conversion means, or a source of coherent light is combinable with optical waveguide for sensing. And an optical circulator which can combine output light from optical waveguide for sensing with a temperature conversion means is used, and you may make it establish a reflective means to reflect guided wave light by one end face of optical waveguide for sensing.

[0010] As for especially a temperature conversion means, it is desirable to consist of a photodetection array which changes a lightwave signal into an electrical signal, and a neural network who processes with an electrical signal by making a detection array into the input section.

[0011] Thus, using optical waveguide for sensing which can spread two or more modes, this invention inputs coherent light so that a speckle pattern may arise in the optical waveguide, receives output light of optical waveguide by photodetector array, inputs it into temperature conversion means, such as a neural network, and searches for temperature by this neural network's etc. processing. Optical waveguide is the usual optical waveguide which two or more modes spread, and it is possible to make it very easy structure without an optical tee.

[0012]

[Example] Drawing 1 shows the 1st example of this invention. This example uses a neural network. That is, the optical waveguide temperature sensor of this example consists of the optical waveguide 3 for sensing which the length or refractive index changes with the source 1 of coherent light, the lens 2 for combining the output light from the source 1 of coherent light with the optical waveguide 3 for sensing, and change of temperature, and can spread two or more modes to coincidence, a lens 4, a photodetector array 5, and a neural network 6 that processes with an electrical signal.

[0013] The light by which outgoing radiation was carried out is inputted into the optical waveguide 3 for sensing through a lens 2 from the source 1 of coherent light. Two or more modes are excited by the optical waveguide 3 for sensing, and the inside of waveguide is spread. If the temperature of the optical waveguide 3 for sensing changes at this time, the refractive index or length of waveguide will change and the near field pattern of the light which carries out outgoing radiation from the optical waveguide 3 for sensing in connection with this will change.

[0014] Drawing 2 - drawing 4 show the count result about the relation between the output reinforcement of the optical waveguide 3 for sensing, and temperature. As shown in this drawing, it turns out that the output intensity distribution (near field pattern) of the optical waveguide 3 for sensing change with temperature. This is for receiving the phase change from which each mode which the refractive index of optical waveguide and length change, and the many modes spread, and spreads waveguide with temperature differs in an outgoing end. In addition, as that from which each mode is excited by homogeneity in waveguide in drawing 2 - drawing 4, although the output intensity distribution over a temperature change were searched for analytically, it is difficult for the reinforcement in the mode excited by the angle and beam diameter of the light which carries out incidence to the optical waveguide 3 for sensing in fact to differ, and to ask for them analytically. However, change of the outgoing radiation pattern to a temperature change exists too also in this case. Therefore, if the relation between temperature as shown to the neural network 6 who has a learning function at

drawing 2 - drawing 4 , and output intensity distribution is made to learn beforehand, it will become possible from output intensity distribution to detect temperature.

[0015] However, in drawing 2 - drawing 4 , the material of the optical waveguide 3 for sensing is quartz glass, and they are a length of 10cm, and core width of face of 51 micrometers. 7 micrometers in thickness It shall consider as $\Delta = 0.2\%$ and the even symmetric mode to the 0-30th order shall be excited by homogeneity. Moreover, the refractive index of glass and the rate of change to the temperature of length are $10^{-5}/\text{degree C}$ and $10^{-7}/\text{degree C}$, respectively, and its contribution of a refractive index is large. Then, change of a refractive index was considered to be change of length equivalent, and was analyzed.

[0016] The output light from the optical waveguide 3 for sensing is combined with the photodetector array 5 with a lens 4. The photodetector array 5 changes a lightwave signal into an electrical signal, and inputs this into a neural network 6. A neural network 6 processes with an electrical signal, and discriminates temperature from the output intensity distribution of optical waveguide according to the internal parameter beforehand set up by study. A neural network 6 can set up freely the relation between the input signal to a neural network 6, and the output signal from a neural network by setting up an internal parameter appropriately as known well. Moreover, the neural network 6 is possible also for making an output signal not change to a slight change of an input signal, and can also change an output signal to reverse sensitively to an input signal so that a function like association or recognition may see.

[0017] Furthermore, by illustrating the combination of some I/O signals to a neural network 6, an internal parameter is changed automatically and it can have desired input/output relation so that a learning function may see. Therefore, distortion and a defect exist in a waveguide configuration, and if temperature and the relation of an outgoing radiation pattern are made to learn even if an outgoing radiation light pattern does not become as predicted, it can ask for change of the temperature of the measuring object from the intensity distribution of a photodetector.

[0018] Here, as a method of making a neural network 6 learning beforehand the output intensity distribution from the optical waveguide which changes intricately to temperature, especially a limit can also be performed as follows, for example, although there is nothing. First, give an exact temperature to the optical waveguide 3 for sensing, and it is made to learn so that a neural network's 6 appropriate neurone may ignite. It actually measures after that. At this time The condition of ignition of neurone For example, so that the method of searching for temperature by what neurone having ignited most greatly, and a, first exact temperature may be given to the optical

waveguide 3 for sensing and the output value corresponding to temperature may be outputted. For example, it is made to learn so that an output value 10 may be outputted at the time of ten temperature and an output value 20 may be outputted at the time of 20 temperature, and actually measures after that, and how to read temperature in an output value etc. can be considered.

[0019] Thus, in this example, the highly precise optical waveguide 3 for sensing is not required, but there is an advantage which can process the output light of optical waveguide at the direct neural network 6. Although the wavelength of the light source to be used needed to be restricted or the optical mask needed to be used for the output of an optical fiber since interference in only a basic mode (LP01 mode) and the primary mode (LP02 mode) was used in the case of the sensor which used the interference in this kind of multimode fiber conventionally, that necessity was lost in this invention. Therefore, using the multi-mode optical waveguide which it is easy and is easy to create, it is highly precise and the large temperature sensor of a dynamic range can consist of this inventions.

[0020] Drawing 5 shows the 2nd example of this invention. In this example, an optical fiber 7 and a lens 8 are interposed between a lens 2 and the optical waveguide 3 for sensing, and the fundamental actuation is completely the same as the 1st example. That is, after the output light of the source 1 of coherent light passes along a lens 2, an optical fiber 7, and a lens 8, it is inputted into the sensing optical waveguide 3. Output intensity distribution change with temperature changes in the optical waveguide 3 for sensing. The output light of the optical waveguide 3 for sensing is combined with the photodetector array 5 with a lens 4. In the photodetector array 5, a lightwave signal is changed into an electrical signal and inputted into a neural network 6. In a neural network 6, temperature is searched for from the output intensity distribution of the photodetector array 5. In said 1st example, since the light source and the sensing section are close, there is a possibility that the light source may be influenced of the temperature change in the sensing section. On the other hand, in this example, since the optical fiber 7 has separated the light source section and the sensor section, there is no possibility that the light source may receive the effect of a temperature change, and it makes it possible to perform more stable sensing.

[0021] Drawing 6 shows the 3rd example of this invention. In this example, a directional coupler 9 is interposed between the optical waveguide 3 for sensing, and a neural network 6, and the reflective film 10 is formed in one end face of the optical waveguide 3 for sensing. That is, after the output light of the source 1 of coherent light passes along a lens 2, an optical directional coupler 9, and a lens 4, it is inputted into

the optical waveguide 3 for sensing. The light inputted into the optical waveguide 3 for sensing is spread as it is, and it is reflected by the reflective film 10 with which the outgoing radiation edge was equipped, and it is spread to hard flow. The output light from the optical waveguide 3 for sensing passes along a lens 4 and an optical directional coupler 9, and is led to the photodetector array 5. The signal by which optical-electrical-and-electric-equipment conversion was carried out by the photodetector array 5 is inputted into a neural network 6. In a neural network 6, temperature is searched for based on the intensity distribution of the photodetector array 5. In this example, since the signal light for measurement goes and comes back to optical waveguide, the variation of a phase doubles compared with the configuration of said 1st and 2nd example. For this reason, sensitivity can be made into said twice example.

[0022] Drawing 7 shows the 4th example of this example. An optical circulator 11 is used in this example. Here, an optical circulator 11 shall have four ports 11-1, 11-2, 11-3, and 11-4, the light inputted into the port 11-1 shall be outputted to a port 11-2, and the light inputted into the port 11-2 shall be outputted to a port 11-3. Therefore, the output light of the source 1 of coherent light is inputted into the optical waveguide 3 for optical sensing after passing a lens 2, the port 11-1 of an optical circulator, 11-2, and a lens 4. The light inputted into the optical waveguide 3 for sensing is spread as it is, and it is reflected by the reflective film 10 with which the outgoing radiation edge was equipped, and it is spread to hard flow. After the output light from the optical waveguide 3 for sensing passes along a lens 4, the port 11-2 of an optical circulator, and 11-3, it is led to the photodetector array 5. The signal by which optical-electrical-and-electric-equipment conversion was carried out by the photodetector array 5 is inputted into a neural network 6. In a neural network 6, temperature is searched for based on the intensity distribution of the photodetector array 5. In this example, since the signal light for measurement goes and comes back to the optical waveguide 3 for sensing, the variation of a phase doubles compared with the configuration of said 1st and 2nd example. For this reason, sensitivity can be made into said twice example.

[0023] Drawing 8 shows the 5th example of this invention. This example uses the bundle fiber 12 which makes the outgoing end of the optical waveguide 3 for sensing correspond to the photodetection array 5. Therefore, after the output light of the source 1 of coherent light passes along a lens 2, an optical fiber 7, and a lens 8, it is inputted into the optical waveguide 3 for sensing. Output intensity distribution change with temperature changes in the optical waveguide 3 for sensing. After the output light of

the optical waveguide 3 for sensing passes the bundle fiber 12, it is combined with the photodetector array 5 with a lens 4. In the photodetector array 5, a lightwave signal is changed into an electrical signal and inputted into a neural network 6. In a neural network 6, temperature is searched for from the output intensity distribution of the photodetector array 5. In this example, it is possible by using an optical fiber 7 and the bundle fiber 12 to separate the temperature sensing section, the light source section, and the signal-processing section. For this reason, the temperature sensing section is made to become independent completely, and it becomes possible to perform the remote sensing of temperature.

[0024]

[Effect of the Invention] As mentioned above, as concretely explained based on the example, according to this invention, change of the output intensity distribution produced from the phase contrast of each propagating mode using change of the refractive index of the optical waveguide by temperature and length can be received by the photodetector array, using the optical waveguide which can spread two or more modes as a sensing portion, it can input into a neural network etc., and temperature can be measured. Although structure was complicated since branching form single mode waveguide was used, according to this invention, a temperature sensor can consist of conventional sensors using the easy optical waveguide of structure.

イ5に対応させるバンドルファイバ12を使用するものである。従って、コヒーレント光源1の出力光は、レンズ2、光ファイバ7、レンズ8、を通った後、センシング用光導波路3に入力する。センシング用光導波路3では、温度変化により出力強度分布が変化する。センシング用光導波路3の出力光はバンドルファイバ12を通過した後、レンズ4により光検出器アレイ5に結合される。光検出器アレイ5では、光信号を電気信号に変換してニューラルネットワーク6に入力する。ニューラルネットワーク6では、光検出器アレイ5の出力強度分布から温度を求める。本実施例では光ファイバ7およびバンドルファイバ12を用いることにより、温度センシング部と光源部、信号処理部を分離することが可能である。このため、温度センシング部を完全に独立させ、温度のリモートセンシングを行うことが可能となる。

【0024】

【発明の効果】以上、実施例に基づいて具体的に説明したように、本発明によれば、複数のモードが伝搬可能な光導波路をセンシング部分として用い、温度による光導波路の屈折率、長さの変化を用いて各伝搬モードの位相差から生ずる出力強度分布の変化を光検出器アレイで受光し、ニューラルネットワーク等に入力し、温度を測定することができる。従来のセンサでは、分岐形単一モード導波路を用いていたため、構造が複雑であったが、本発明によれば、構造の簡単な光導波路を用いて温度センサを構成することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第一の実施例に係る光導波路温度センサの構成図である。

【図2】センシング用光導波路の出力強度変化と温度との関係を示すグラフである。

【図3】センシング用光導波路の出力強度変化と温度との関係を示すグラフである。

【図4】センシング用光導波路の出力強度変化と温度との関係を示すグラフである。

【図5】本発明の第二の実施例に係る光導波路温度センサの構成図である。

【図6】本発明の第三の実施例に係る光導波路温度センサの構成図である。

【図7】本発明の第四の実施例に係る光導波路温度センサの構成図である。

【図8】本発明の第五の実施例に係る光導波路温度センサの構成図である。

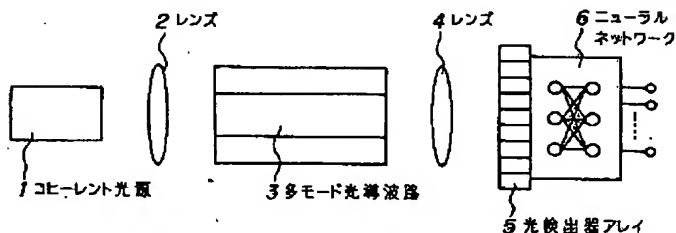
【図9】従来の光導波路型温度センサの構成図である。

【図10】マツハツエнда形導波路の光強度と温度との関係を示すグラフである。

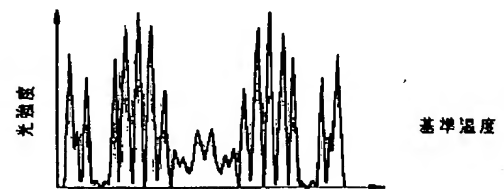
【符号の説明】

- 1 コヒーレント光源
- 2 レンズ
- 3 光導波路
- 4 レンズ
- 5 光検出アレイ
- 6 ニューラルネットワーク
- 7 光ファイバ
- 8 レンズ
- 9 光方向性結合器
- 10 反射膜
- 11 光サーキュレータ
- 11-1 ポート
- 11-2 ポート
- 11-3 ポート
- 11-4 ポート
- 12 バンドルファイバ
- 101 入力光
- 102 光導波路
- 103 出力光

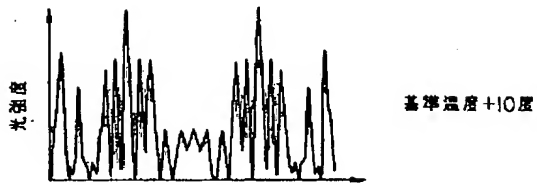
【図1】



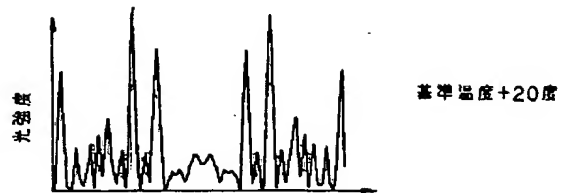
【図2】



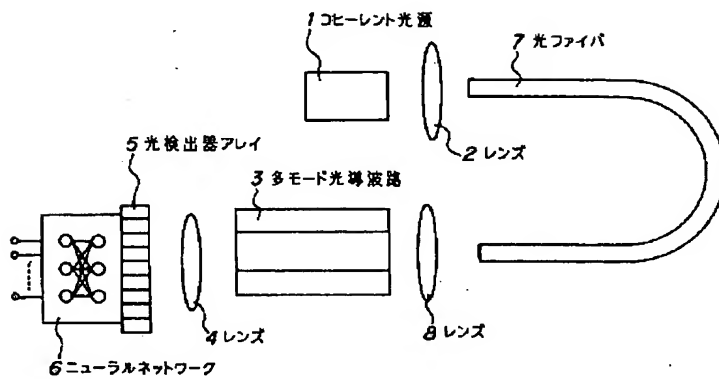
【図3】



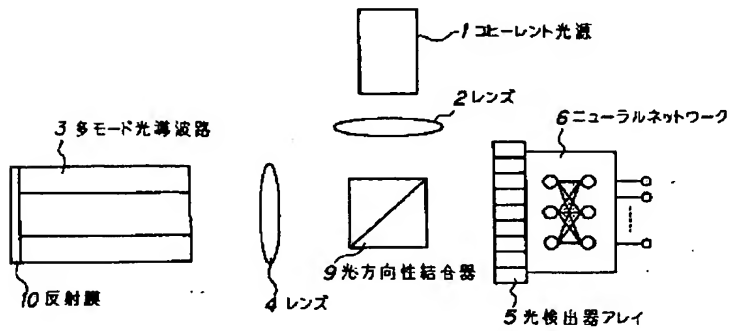
【図4】



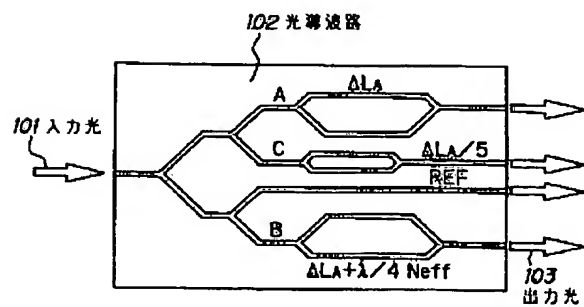
【図5】



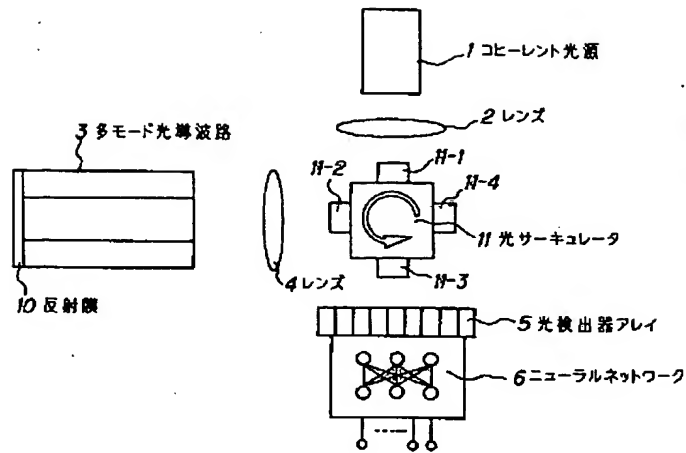
【図6】



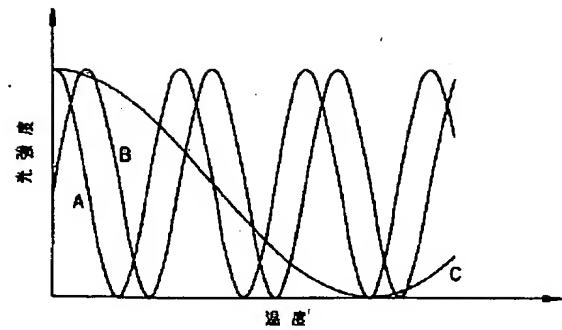
【図9】



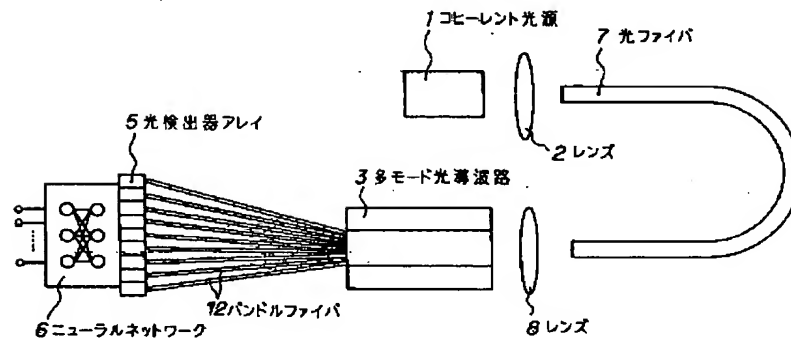
【図 7】



【図 10】



【図 8】



フロントページの続き

(51) Int. Cl. 6

G 0 2 B 6/12

G 0 6 F 7/60

識別記号

庁内整理番号

F 1

技術表示箇所

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平7-181087

(43) 公開日 平成7年(1995)7月18日

(51) Int.Cl. ⁹	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
G 0 1 K 11/12	Z			
G 0 2 B 6/00	F			
		G 0 2 B 6/00		
		6/12	Z	

審査請求 未請求 請求項の数6 FD (全7頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願平2-411028

(22) 出願日 平成2年(1990)12月17日

(71) 出願人 000004226

日本電信電話株式会社

東京都千代田区内幸町一丁目1番6号

(72) 発明者 相沢 茂樹

東京都千代田区内幸町一丁目1番6号 日本電信電話株式会社内

(72) 発明者 野口 一博

東京都千代田区内幸町一丁目1番6号 日本電信電話株式会社内

(72) 発明者 松本 隆男

東京都千代田区内幸町一丁目1番6号 日本電信電話株式会社内

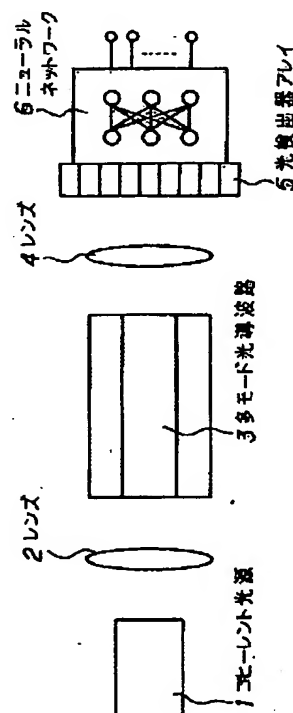
(74) 代理人 弁理士 光石 英俊 (外1名)

(54) 【発明の名称】 光導波路温度センサ

(57) 【要約】

〔目的〕 複数のモードが伝搬可能な光導波路をセンシング部分として用い、作成が容易で、構造の簡単な光導波路温度センサを提供することを目的とする。

〔構成〕 光導波路が温度により屈折率、長さ等が変化し、これにより、各伝搬モードの位相差から生じる出力光強度の変化を利用し、予め学習した結果に基づいて、光導波路を伝搬するモードの分布から温度変化に変換するニューラルネットワーク等の温度変換手段を使用するので、温度を簡単確実に検出することが可能となる。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 温度に応じて導波する光のモード分布が変化するセンシング用光導波路と、前記センシング用光導波路中に複数のモードを励振することができるコヒーレント光源と、前記コヒーレント光源からの出力光を前記センシング用光導波路に結合する第一の光結合手段と、予め学習した前記センシング用光導波路の温度によって異なる光のモード分布と温度との関係に基づいて前記センシング用光導波路から出力した光のモード分布を温度変化に変換する温度変換手段と、前記温度変換手段に前記センシング用光導波路からの出力光を結合する第二の光結合手段とを有することを特徴とする光導波路温度センサ。

【請求項2】 前記第一の光結合手段として、光ファイバを使用することを特徴とする請求項1記載の光導波路温度センサ。

【請求項3】 前記第一及び第二の光結合手段として、前記コヒーレント光源からの出力光を前記センシング用光導波路に結合することができ、且つ、前記センシング用光導波路からの出力光を前記コヒーレント光源からの出力光と分離して前記温度変換手段に結合できる光方向性結合器を使用し、前記センシング用光導波路の一方の端面に導波光を反射膜を形成したことを特徴とする請求項1記載の光導波路温度センサ。

【請求項4】 前記第一及び第二の光結合手段として、前記コヒーレント光源からの出力光を前記センシング用光導波路に結合することができ、且つ、前記センシング用光導波路からの出力光を前記温度変換手段に結合することができる光サーキュレータを使用し、前記センシング用光導波路の一方の端面で導波光を反射する反射手段を設けたことを特徴とする請求項1記載の光導波路温度センサ。

【請求項5】 前記第二の光結合手段として、前記センシング用光導波路の各位置における光強度を、これに対応した前記温度変換手段に伝搬することができるバンドルファイバを使用したことを特徴とする請求項1記載の光導波路温度センサ。

【請求項6】 前記温度変換手段は、光信号を電気信号に変換する光検出アレイと、前記検出アレイを入力部として、電気信号により処理するニューラルネットワークとから構成されることを特徴とする請求項1記載の光導波路温度センサ。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】 本発明は、光導波路を利用した温度センサに関するものである。

【0002】

【従来の技術】 従来のこの種の技術としては、図9に示す導波路形温度センサが知られている（“Integrated optical temperature sensor”, Appl. Phys. Lett., 41, 1

5, pp134-136(1982)）。同図に示すように光導波路102に入力したコヒーレント入力光101は光導波路102中において、四つに分岐され、おのおのマッハツェンダ形導波路A, B, C及びモニタ用導波路REFを進行する。ここで、導波路102において、マッハツェンダ形導波路Aの光路長差を ΔL_A とした場合、マッハツェンダ形導波路Bの光路長差が $\Delta L_A + \lambda/4N_{\text{eff}}$ 、マッハツェンダ形導波路Cの光路長差が $\Delta L_A/5$ となるように設計されている。

【0003】 この時、マッハツェンダ形導波路A, B, Cの出力光強度及び比例定数bは次式で表される。

【数1】

$$\frac{P_{out1}}{P_{in1}} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} b \Delta L_A T + \Delta \phi_0 \right) \right\}$$

$$b = \frac{dN_{\text{eff}}}{dT} + \frac{N_{\text{eff}}}{\Delta L_A} \frac{d\Delta L_A}{dT}$$

$$\frac{P_{out2}}{P_{in2}} = \frac{1}{2} \left\{ (1 + \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} b \Delta L_A T + \Delta \phi_0 \right)) \right\}$$

$$\frac{P_{out3}}{P_{in3}} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos \left(\frac{2\pi}{5\lambda} b \Delta L_A T + \Delta \phi_0 \right) \right\}$$

ここで、 λ は波長、 T は温度、 N_{eff} は導波路のコアの実効屈折率、 P_{in1} 、 P_{in2} 、 P_{in3} はそれぞれ、マッハツェンダ形導波路A, B, Cの入力光強度、 $\Delta \phi_0$ は定数である。図10にマッハツェンダ形導波路A, B, Cの出力強度の温度依存性を示す。ここで、温度変化に対する光強度の変化すなわちグラフの傾きがセンサの感度を表す。また、光導波路の出力光強度は温度に対して周期的に変化するが、1周期の中では温度と光強度は1対1に対応しているため光強度から直ちに温度を求めることができる。これをセンサのダイナミックレンジという。マッハツェンダ形導波路A, Bの出力は互いに90度の位相差を持っているため、マッハツェンダ形導波路Aの感度が最低になるところで、マッハツェンダ形導波路Bの感度が最高になっている。このように2つのマッハツェンダ干渉計を用いることにより、感度の低下する部分を互いに補償している。一方、マッハツェンダ形導波路Cはマッハツェンダ形導波路Aに比べて温度に対する光強度の変化の周期が5倍遅くなっているため、マッハツェンダ形導波路Cの光出力を用いることによりマッハツェンダ形導波路Aの光出力を用いた場合に比べて、ダイナミックレンジも5倍になっている。さらに、モニタ用導波路REFの光強度をモニタして、入力光強度の変化を監視し、強度変化を補正している。

【0004】

【発明が解決しようとする課題】 従来の光導波路温度センサでは、上述したように3つのマッハツェンダ形導波路A, B, Cを用いることにより、高感度を保ちなが

ら、ダイナミックレンジを拡大することができる。

【0005】しかしながら、従来では、高感度でしかもダイナミックレンジの広いものを構成するために、構造が複雑で、作成が難しいセンシング光導波路を用いる必要があるという問題点があった。

【0006】本発明は、上記従来技術に鑑みてなされたものであり、作成が簡単で、構造の簡単な光導波路を用いて光導波路温度センサを提供することを目的とするものである。

【0007】

【課題を解決するための手段】斯かる目的を達成する本発明の構成は温度に応じて導波する光のモード分布が変化するセンシング用光導波路と、センシング用光導波路中に複数のモードを励振することができるコヒーレント光源と、コヒーレント光源からの出力光をセンシング用光導波路に結合する第一の光結合手段と、予め学習したセンシング用光導波路の温度によって異なる光のモード分布と温度との関係に基づいてセンシング用光導波路から出力した光のモード分布を温度変化に変換する温度変換手段と、温度変換手段にセンシング用光導波路からの出力光を結合する第二の光結合手段とを有することを特徴とする。

【0008】ここで、第一の光結合手段として光ファイバ、第二の光結合手段としてバンドルファイバをそれぞれ使用することができる。

【0009】また、第一及び第二の光結合手段として、コヒーレント光源からの出力光をセンシング用光導波路に結合することができ、且つ、センシング用光導波路からの出力光をコヒーレント光源からの出力光と分離して温度変換手段に結合できる光方向性結合器或いはコヒーレント光源からの出力光をセンシング用光導波路に結合することができ、且つ、センシング用光導波路からの出力光を温度変換手段に結合することができる光サーキュレータを使用し、センシング用光導波路の一方の端面で導波光を反射する反射手段を設けるようにしても良い。

【0010】特に、温度変換手段は、光信号を電気信号に変換する光検出アレイと、検出アレイを入力部として、電気信号により処理するニューラルネットワークとから構成されることが望ましい。

【0011】このように本発明は、複数のモードが伝搬可能なセンシング用光導波路を用い、その光導波路中にスペckルパターンが生ずるようにコヒーレント光を入力し、光導波路の出力光を光検出器アレイで受光し、ニューラルネットワーク等の温度変換手段に入力し、かかるニューラルネットワーク等の処理により温度を求める。光導波路は複数のモードが伝搬する通常の光導波路であり、光分岐部を持たず非常に簡単な構造にすることが可能である。

【0012】

【実施例】図1は本発明の第1の実施例を示す。本実施

例は、ニューラルネットワークを使用するものである。即ち、本実施例の光導波路温度センサは、コヒーレント光源1と、コヒーレント光源1からの出力光をセンシング用光導波路3に結合するためのレンズ2と、温度の変化によりその長さあるいは屈折率が変化し、かつ複数のモードを同時に伝搬することが可能であるセンシング用光導波路3と、レンズ4と、光検出器アレイ5と、電気信号で処理するニューラルネットワーク6とから構成される。

【0013】コヒーレント光源1より出射された光はレンズ2を通してセンシング用光導波路3に入力される。センシング用光導波路3には複数のモードが励振され、導波路中を伝搬していく。この時、センシング用光導波路3の温度が変化すると、導波路の屈折率あるいは長さが変化し、これに伴ってセンシング用光導波路3から出射する光のニアフィールドパターンが変化する。

【0014】図2～図4はセンシング用光導波路3の出力強度と温度との関係についての計算結果を示す。同図に示すように、センシング用光導波路3の出力強度分布（ニアフィールドパターン）は温度により変化することがわかる。これは、温度により、光導波路の屈折率、長さが変化して多モードが伝搬し、導波路を伝搬する各モードが出力端において異なる位相変化を受けるためである。なお、図2～図4では導波路中に各モードが均一に励振されるものとして、温度変化に対する出力強度分布を解析的に求めたが、実際には、センシング用光導波路3に入射する光の角度やビーム径により励振されるモードの強度は異なり、それらを解析的に求めることは難しい。しかし、この場合にも温度変化に対する出射パターンの変化はやはり存在する。従って、学習機能を有するニューラルネットワーク6に図2～図4に示すような温度と出力強度分布の関係を予め学習させれば、出力強度分布から温度を検知することが可能となる。

【0015】但し、図2～図4において、センシング用光導波路3の材料は石英ガラスであり、長さ10cm、コア幅 $5.1\mu\text{m}$ 、厚さ $7\mu\text{m}$ 、 $\Delta=0.2\%$ とし、0～30℃までの偶数次モードが均一に励振されるものとした。また、ガラスの屈折率、および長さの温度に対する変化率はそれぞれ、 $1.0^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 、 $1.0^{-7}/^{\circ}\text{C}$ であり、屈折率の寄与が大きい。そこで、屈折率の変化を等価的に長さの変化と考慮して解析した。

【0016】センシング用光導波路3からの出力光はレンズ4により光検出器アレイ5に結合される。光検出器アレイ5は、光信号を電気信号に変換し、これをニューラルネットワーク6に入力する。ニューラルネットワーク6は電気信号により処理するものであり、予め学習によって設定されている内部パラメータに従って、光導波路の出力強度分布から温度を識別する。ニューラルネットワーク6は、よく知られているように、内部パラメータを適切に設定することにより、ニューラルネットワー

ク6への入力信号とニューラルネットワークからの出力信号との関係を自由に設定することができる。また、ニューラルネットワーク6は連想や認識のような機能に見られるように、入力信号のわずかな変化に対して出力信号を変化しないようにすることも可能であり、逆に入力信号に対して敏感に出力信号を変化させることもできる。

【0017】さらに、学習機能に見られるように、いくつかの入出力信号の組合せをニューラルネットワーク6に例示することにより、自動的に内部パラメータを変化させて、所望の入出力関係を有するようになることもできる。従って、導波路形状に歪や欠陥が存在し、出射光パターンが計算通りにならなくとも温度と出射パターンの関係を学習させれば、光検出器の強度分布から測定対象の温度の変化を求めることができる。

【0018】ここで、温度に対して複雑に変化する光導波路からの出力強度分布を、ニューラルネットワーク6に予め学習させる方法としては、特に制限はないが、例えば次のように行うこともできる。まず、正確な温度をセンシング用光導波路3に与えて、ニューラルネットワーク6のしかるべきニューロンが発火するように学習させ、その後に、実際に測定を行い、この時、ニューロンの発火の状態、例えば、どこのニューロンが一番大きく発火しているかによって温度を求める方法や、まず、正確な温度をセンシング用光導波路3に与えて、温度に対応した出力値を出力するように、例えば、温度10度の時に出力値10を、温度20度の時に出力値20を出力するように学習を行わせ、その後に実際に測定し、出力値から温度を読み取る方法等が考えられる。

【0019】このように本実施例では、高精度なセンシング用光導波路3が要求されず、光導波路の出力光を直接ニューラルネットワーク6で処理できる利点がある。従来この種の多モードファイバ中の干渉を利用したセンサの場合、基本モード(LP01モード)と1次モード(LP02モード)のみの干渉を使うので、使用する光源の波長を制限したり、光ファイバの出力に光学的なマスクを使用する必要があったが、本発明では、その必要がなくなった。従って、本発明では、簡単に作成しやすい多モード光導波路を用いて高精度でダイナミックレンジの広い温度センサを構成することができる。

【0020】図5は本発明の第2の実施例を示す。本実施例では、光ファイバ7、レンズ8をレンズ2、センシング用光導波路3の間に介設したものであり、その基本的な動作は第1の実施例とまったく同じである。即ち、コヒーレント光源1の出力光は、レンズ2、光ファイバ7、レンズ8、を通った後、センシング光導波路3に入力する。センシング用光導波路3では、温度変化により出力強度分布が変化する。センシング用光導波路3の出力光はレンズ4により光検出器アレイ5に結合される。光検出器アレイ5では、光信号を電気信号に変換してニ

ューラルネットワーク6に入力する。ニューラルネットワーク6では、光検出器アレイ5の出力強度分布から温度を求める。前記第1の実施例では、光源とセンシング部とが近接しているため、光源がセンシング部における温度変化の影響を受けるおそれがある。これに対して、本実施例では、光ファイバ7によって光源部とセンサ部を分離しているため、光源が温度変化の影響をうけるおそれがなく、より安定なセンシングを行うことを可能としている。

【0021】図6は本発明の第3の実施例を示す。本実施例では、センシング用光導波路3とニューラルネットワーク6との間に方向性結合器9を介設し、センシング用光導波路3の一方の端面に反射膜10を形成したものである。即ち、コヒーレント光源1の出力光はレンズ2、光方向性結合器9、レンズ4を通った後、センシング用光導波路3に入力される。センシング用光導波路3に入力された光は、そのまま伝搬し、出射端に装着された反射膜10によって反射され、逆方向に伝搬する。センシング用光導波路3からの出力光はレンズ4、光方向性結合器9を通り、光検出器アレイ5に導かれる。光検出器アレイ5で光-電気変換された信号はニューラルネットワーク6に入力する。ニューラルネットワーク6では、光検出器アレイ5の強度分布に基づき温度を求める。本実施例では、測定のための信号光は光導波路を往復するため、前記第1、第2の実施例の構成に比べて位相の変化量が2倍になる。このため感度を前記実施例の2倍にすることができる。

【0022】図7は本実施例の第4の実施例を示す。本実施例では、光サーキュレータ11を使用するものである。ここで、光サーキュレータ11は四つのポート11-1、11-2、11-3、11-4を有し、ポート11-1に入力した光はポート11-2に出力され、ポート11-2に入力した光はポート11-3に出力されるものとする。従って、コヒーレント光源1の出力光は、レンズ2、光サーキュレータのポート11-1、11-2、レンズ4を通過後、光センシング用光導波路3に入力する。センシング用光導波路3に入力した光は、そのまま伝搬し、出射端に装着された反射膜10によって反射され、逆方向に伝搬する。センシング用光導波路3からの出力光はレンズ4、光サーキュレータのポート11-2、11-3を通った後、光検出器アレイ5に導かれる。光検出器アレイ5で光-電気変換された信号はニューラルネットワーク6に入力する。ニューラルネットワーク6では、光検出器アレイ5の強度分布に基づき温度を求める。本実施例では、測定のための信号光はセンシング用光導波路3を往復するため、前記第1、第2の実施例の構成に比べて位相の変化量が2倍になる。このため感度を前記実施例の2倍にすることができる。

【0023】図8は本発明の第5の実施例を示す。本実施例は、センシング用光導波路3の出力端を光検出アレイ

イ5に対応させるバンドルファイバ12を使用するものである。従って、コヒーレント光源1の出力光は、レンズ2、光ファイバ7、レンズ8、を通った後、センシング用光導波路3に入力する。センシング用光導波路3では、温度変化により出力強度分布が変化する。センシング用光導波路3の出力光はバンドルファイバ12を通過した後、レンズ4により光検出器アレイ5に結合される。光検出器アレイ5では、光信号を電気信号に変換してニューラルネットワーク6に入力する。ニューラルネットワーク6では、光検出器アレイ5の出力強度分布から温度を求める。本実施例では光ファイバ7およびバンドルファイバ12を用いることにより、温度センシング部と光源部、信号処理部を分離することが可能である。このため、温度センシング部を完全に独立させ、温度のリモートセンシングを行うことが可能となる。

【0024】

【発明の効果】以上、実施例に基づいて具体的に説明したように、本発明によれば、複数のモードが伝搬可能な光導波路をセンシング部分として用い、温度による光導波路の屈折率、長さの変化を用いて各伝搬モードの位相差から生ずる出力強度分布の変化を光検出器アレイで受光し、ニューラルネットワーク等に入力し、温度を測定することができる。従来のセンサでは、分岐形単一モード導波路を用いていたため、構造が複雑であったが、本発明によれば、構造の簡単な光導波路を用いて温度センサを構成することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第一の実施例に係る光導波路温度センサの構成図である。

【図2】センシング用光導波路の出力強度変化と温度との関係を示すグラフである。

【図3】センシング用光導波路の出力強度変化と温度との関係を示すグラフである。

【図4】センシング用光導波路の出力強度変化と温度との関係を示すグラフである。

【図5】本発明の第二の実施例に係る光導波路温度センサの構成図である。

【図6】本発明の第三の実施例に係る光導波路温度センサの構成図である。

【図7】本発明の第四の実施例に係る光導波路温度センサの構成図である。

【図8】本発明の第五の実施例に係る光導波路温度センサの構成図である。

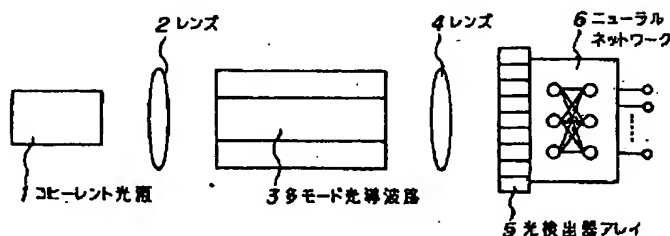
【図9】従来の光導波路型温度センサの構成図である。

【図10】マッハツェンダ形導波路の光強度と温度との関係を示すグラフである。

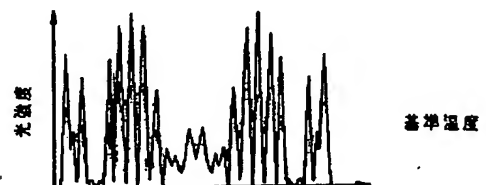
【符号の説明】

- 1 コヒーレント光源
- 2 レンズ
- 3 光導波路
- 4 レンズ
- 5 光検出アレイ
- 6 ニューラルネットワーク
- 7 光ファイバ
- 8 レンズ
- 9 光方向性結合器
- 10 反射膜
- 11 光サーキュレータ
- 11-1 ポート
- 11-2 ポート
- 11-3 ポート
- 11-4 ポート
- 12 バンドルファイバ
- 101 入力光
- 102 光導波路
- 103 出力光

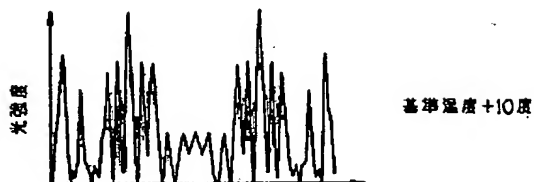
【図1】



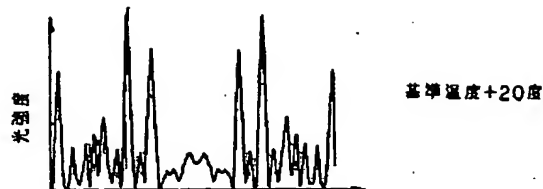
【図2】



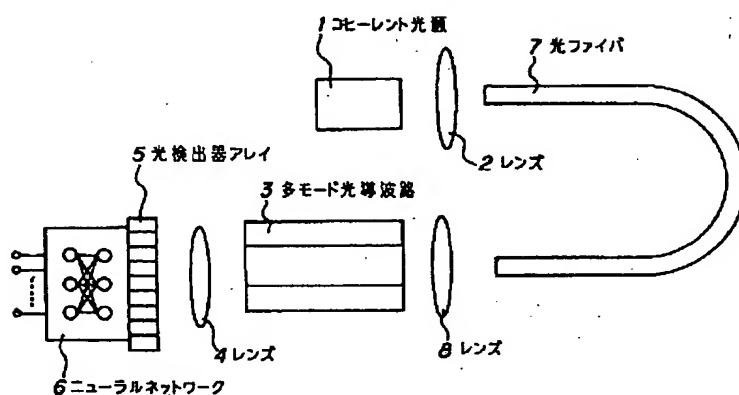
【図3】



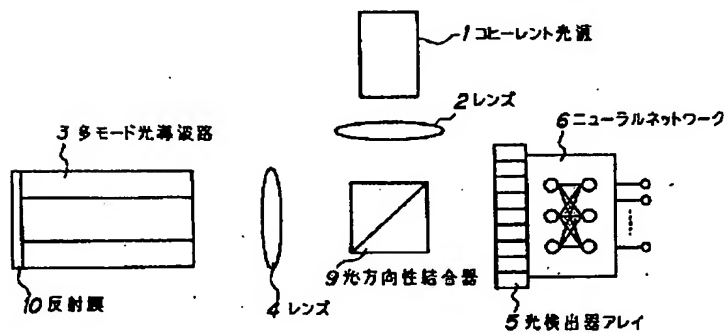
【図4】



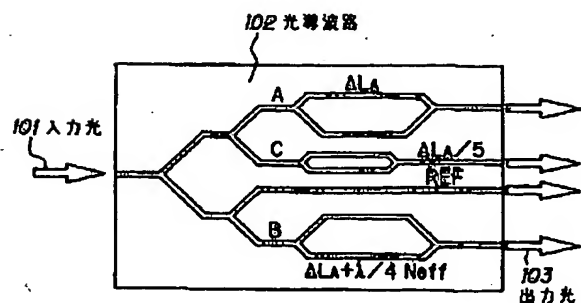
【図5】



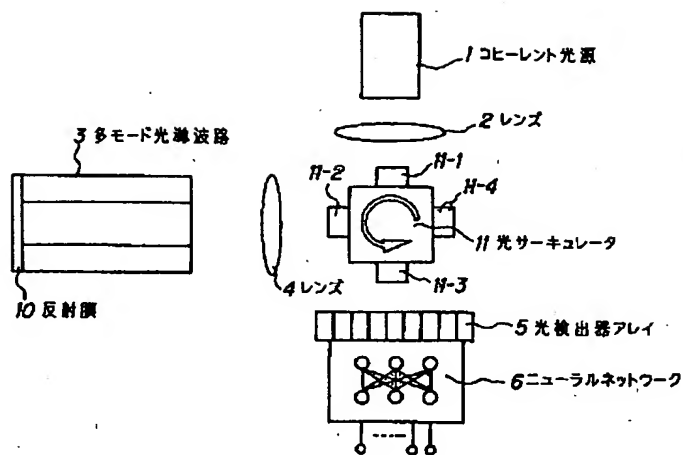
【図6】



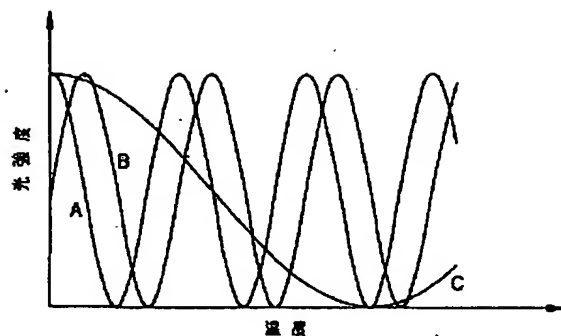
【図9】



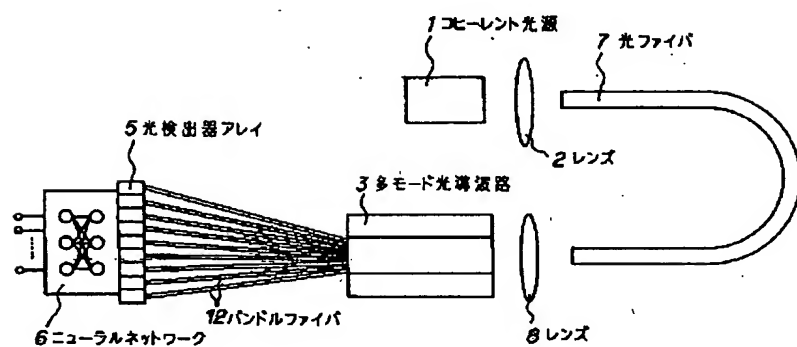
【図7】



【図10】



【図8】



フロントページの続き

(51) Int. Cl. 6

G 0 2 B 6/12

G 0 6 F 7/60

識別記号

庁内整理番号

F I

技術表示箇所